

落水表情に着目した河川横断構造物の デザイン方法論*

—— 越流型固定堰の表情予測 ——

The methodologies for design of the structures across rivers

一丸 義和** 篠原 修***

by Yoshikazu ICHIMARU, Osamu SHINOHARA

Current design of the structures across rivers, such as weirs or falling works are largely decorative. For example, decoration element in river walls are considered following construction of the weirs. However, this is not actually design, for real design should predict the expression of the water stream which flows down the weir. For this purpose, we need to identify methodologies for design. In this paper, the expression made by bubbles are considered in the development of a new method to predict the expression of falling water. A case study is undertaken to test method of prediction.

1.はじめに

(1) 背景と目的

河川の持つ機能の中に親水というキーワードが加えられてから、すでにかかなりの年月が経過した。当然のことながら固定堰、落差工に代表される河川横断構造物に対しても、親水機能の要請は高まっている。しかし、現状を見る限りでは、視点場の確保や構造物周辺の護岸修景等の装飾的デザインで親水機能を代弁しているに過ぎないのではなからうか。固定堰、落差工の本体については利水、治水条件をマニュアル類に代入しただけのステレオタイプの設計しかされていない。本来の親水機能とは構造物本体を流れ落ちる水の表情、落水表情で人々を堪能させ

るべきものである。では、なぜ今日に至るまで落水表情演出を意図した堰本体の設計がなされなかったのか。それは、とりもなおさず、流れの表情と水理学的条件との対応付けを考えようとする姿勢がなかったからである。つまり、求められる機能と流れの表情演出を同時に満たすデザイン方法論が欠如していたからである。

むしろ固定堰、落差工を流下する水の流れ、水の白み、泡の発生についてはこれまで数多くの研究がなされている。が、それらの研究は水理現象の分析が主であり、その目的に流れの表情のコントロールを掲げているものはない。これでは流れの表情そのものをデザインした固定堰、落差工は望むべくもない。それらの水理学的知見を流れの表情の観点から見直せば流れの表情のデザインに応用できるものがあり、またそこで議論される水理学的条件を設計条件としてうまく取り込めば美しい水空間のデザインが可能になると考えられる。以上の背景に基づき本

*キーワード：河川横断構造物、堰、落水表情

** 学生員 東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻

***正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

論文では以下のことを目的とする。

- 1) 固定堰、落差工に関する水理学的研究成果を流れの表情の観点から体系的に整理する。
- 2) 流れの表情と水理学的条件を対応付ける。
- 3) 対応付けを利用して、流れの表情を予測しコントロールすることのできる新たなデザイン方法論を提示する。

(2) 本論文のスタンスと研究対象

ここで予め断っておかねばならないことであるが、本論文で用いた水理式公はきわめて初歩的なものである。第一線の研究においては理論上の進歩、解析精度の向上の可能性は多いにある。が、しかし、本論文の意図は飽くまでもデザイン方法論の提示にある故、用いた公式の精度に関する議論は行っていない。今後より精度の高い水理式を採用するにやぶさかでない。

本論文で研究対象としているのはコンクリート構造の標準型越流構造物である。その理由は以下の通りである。

- 1) 通常の設計指針類に準拠しつつも、観点を変えれば、多様な水の表情が演出可能であることを示すため。
- 2) 新たなデザイン方法論を提示しようとするときには水の表情を水理学的知見で説明できなければならない。自然石を利用した、あるいは不規則形状の構造物では、その落水メカニズムに未知の領域が多分にあるため本論文の対象外とした。

標準型構造物の中にも越流型と自由落下型があるが本論文では越流型を扱う(図-1参照)。堰は最大15mにまで及び比較的落差量も大きく¹⁾、落水面に負圧が発生しないよう²⁾、越流型の形式が主に採られる。また、落差工では落差1~2m、落水面角度も鉛直ないしは、それに近い急勾配の自由落下型が多い³⁾。

2. 水の表情分離とその水理学的意味

今回は図-1にあるように落水表情を落水部(構造

物落水面での表情)と、着水部(護床工上での表情)に分けて考え、その表情を規定するエレメントとして泡に着目した。

まず落水部で呈される表情は泡によって規定され、泡は乱流境界層発達による空気混入によって形づくられる。写真-1の落水部で見られる表情がそれである。一方、写真-2の落水部では空気混入が見られない。

次に着水部で呈される表情・泡はその跳水形式によって左右される。自由跳水ならば写真-2の表情になり、潜り跳水ならば、写真-1のように潜った泡の表情になる。

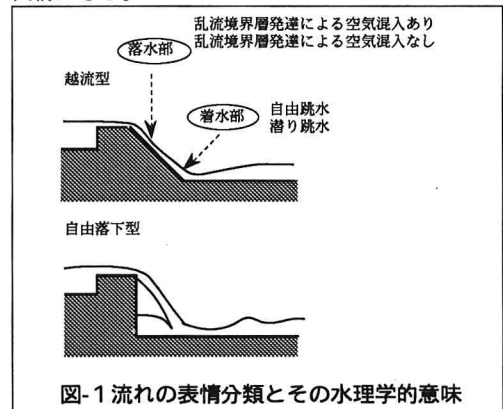


図-1 流れの表情分類とその水理学的意味

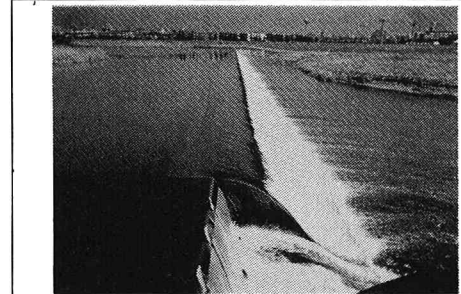


写真-1 上河原用水堰(多摩川) 空気混入あり・潜り跳水



写真-2 昭和用水堰(多摩川) 空気混入なし・自由跳水

3. 流れの表情とその規定要因

(1) 規定要因

規定要因は一次要因と二次要因の二つに大別される(図-2参照)。一次要因は水面形状、前述の泡の状態(落水部、着水部)を規定する。いわば流れの表情のアウトラインを決定するのが一次要因である。二次要因は構造物の材質やテクスチャであり、それらによって細かな水面形状(波形)や泡が決定される。しかし二次要因による表情の変化は水理学的に非常に複雑であり、設計条件に組み込むことは困難であるが故、以下では一次要因を扱い、その表情との対応を考える。

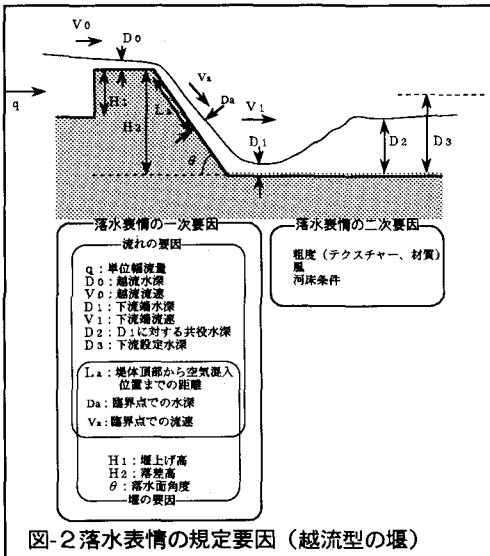


図-2 落水表情の規定要因 (越流型の堰)

(2) 落水水面表情の決定条件

標準型越流頂に関する流量公式として岩崎公式を用いる²⁾。なお、これからの議論では単純化のためナップ部(リップ部)で負圧が発生しないものとし、落下による減勢効果も無視することとする。

$$q = C(D_0)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$C = 2.2 - 0.0416 \times \left(\frac{D_0}{H_1} \right)^{0.99} \quad (2)$$

$$V_0 = \frac{q}{D_0} \quad (3)$$

q : 単位幅流量

C : 流量係数

(1)、(2)式を基に繰り返し計算によって越流水深 D_0 、越流流速 V_0 が導出される。落水面は急勾配水路と考える。流れの乱流境界層が発達して自由表面に達したところを臨界点と呼び、この位置より下流では流れに空気が混入される。Michels-Lovely公式を利用する⁴⁾。

$$\frac{L_a}{D_a} = 405.5 \times \left(\frac{v}{q} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (4)$$

D_a : 臨界点での水深

v : 水の動粘性係数 20.3℃で $v = 0.01 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$

L_a : 堰頂を原点としたときの空気混入位置までの距離

さらにベルヌーイ定理と流量保存の条件から以下の式がえられる。ただし落差部延長が高々10数mという短いオーダーのため摩擦による損失水頭を無視する。

$$\frac{V_0^2}{2g} + D_0 + L_a \sin \theta = \frac{V_a^2}{2g} + D_a \quad (5)$$

$$q = D_0 V_0 = D_a V_a \quad (6)$$

V_a : 臨界点での流速

(5)、(6)式より次式が得られる。

$$D_a^3 - \left(\frac{V_0^2}{2g} + D_0 + L_a \sin \theta \right) \times D_a^2 + \frac{q^2}{2g} = 0 \quad (7)$$

(7)式を満たす三次方程式の正の二実根のうち小さい方を D_a とし、(4)式に代入して繰り返し計算を行い D_a 、 L_a を決定する。ここで D_a として小さい方の値を用いたのは、越流型ではナップ部で限界水深をむかえ、落水面では常に射流状態であるからである。

$$H_2 \geq L_a \sin \theta + D_3 \quad (8)$$

$$H_2 \leq L_a \sin \theta + D_3 \quad (9)$$

落差高 H_2 、空気混入位置までの鉛直方向落差 $L_a \sin \theta$ 、下流設定水深 D_3 の位置関係から(8)式を満たせば写真-1の境界層発達による空気混入がある表情を呈する。(9)式を満たせば写真-2の境界層発達による空気混入がない表情を呈することがわかる。

(3) 着水面表情の決定条件

前節同様(1)、(2)、(3)式を用いて D_0 、 V_0 を決定する。ここで、(7)式での $L \sin \theta$ を H_2 、 D_a を D_1 、 V_a を V_1 に変換する。ベルヌーイ定理、流量保存の条件を用いて下流端水深 D_1 、下流端流速 V_1 が導出される。さらに、 D_1 に対する共役水深 D_2 が(10)式により求められる。

$$D_2 = \frac{1}{2} D_1 \times \left\{ (1 + 8F_{r1}^2)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \quad (10)$$

$$F_{r1} = \frac{V_1}{(gD_1)^{\frac{1}{2}}}$$

$$D_2 \geq D_3 \quad (11)$$

$$D_2 \leq D_3 \quad (12)$$

共役水深 D_2 と下流設定水深 D_3 の関係から(11)式を満たせば写真-2の自由跳水による表情を呈し、(12)式を満たせば、写真-1の潜り跳水による表情を呈する。

4. 落水表情予測図

(1) デザインパラメーターの設定

実際に構造物をデザインする段階では、流れの表情の予測が必要となる。3章での知見を基に越流型の落水表情予測図の作成を試みる。まずデザインする上で、デザイナーが操作可能な規定要因（今後はデザインパラメーターと呼ぶ）と所与の規定要因を区別せねばならない。

デザインパラメーター	
単位幅流量	q
下流設定水深	D_3
落差高	H_2
落水面角度	θ

落差高、落水面角度はともに構造物のパラメーターである故、当然デザインの操作対象と成りうる。単位幅流量、下流設定水深は河川のパラメーターである。一見、所与の規定要因と思えるが、単位幅流量は本体上流部で河道を狭化、拡化すること

で操作可能であろう。また下流設定水深は本体下流部での堰上げ等によって操作できる。

(2) 落水表情予測図の作成

前述4つのデザインパラメーターの中の q 、 D_3 を固定して θ 、 H_2 を変化させ、落水表情予測図を作成すると図-3が得られる。境界線アは落水部での表情を、境界線イは着水部での表情をそれぞれ区別し4つの表情の領域区分図が得られる。境界線の求め方は以下の通り。

【境界線ア】

落水面形状より

$$y = \tan \theta \cdot x = H_2 - D_3$$

$$L_a = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}} = \left\{ \left(\frac{1}{\tan^2 \theta + 1} \right) \cdot (H_2 - D_3)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

(7)式をもとに

$$D_a^3 - \left(\frac{V_0^2}{2g} + D_0 + H_2 - D_3 \right) \times D_a^3 + \frac{q^2}{2g} = 0 \quad (14)$$

(4)、(13)、(14)式より H_2 と θ の関係を求めると境界線アが決定される。

【境界線イ】

境界線イ上では下流設定水深 D_3 ＝共役水深 D_2 の関係が満たされているはずである。(10)式より

$$D_3 = D_2 = \frac{1}{2} D_1 \times \left\{ (1 + 8F_{r1}^2)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \quad (15)$$

$$F_{r1} = \frac{q}{D_1 \sqrt{gD_1}}$$

(7)式を応用して

$$D_1^3 - \left(\frac{V_0^2}{2g} + D_0 + H_2 \right) \times D_1^2 + \frac{q^2}{2g} = 0 \quad (16)$$

(15)、(16)式より H_2 を求めると境界線イが決定される。

図-3の破線に着目すると H_2 を変化させることにより3つの領域を表情が遷移し、 θ を変化させると2つの領域を表情が遷移する。つまり、この予測図を用いることによって構造物の落差量と落水面角度が分かれば、その表情が予測できるのである。逆に、演出したい表情を基にその表情が演出可能な落

差高と落水面角度を求めることも可能である。

上記の要領で単位幅流量 q 及び下流設定水深 D_3 も変化させて、 q, D_3, θ, H_2 をパラメーターとした表情予測図が表-1である。この表でも同様に、4つのパラメーター変化による表情予測と、演出したい表情を満足する4つのパラメーターの値が求められる。

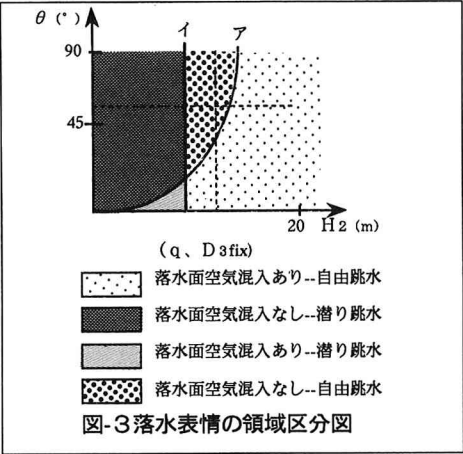
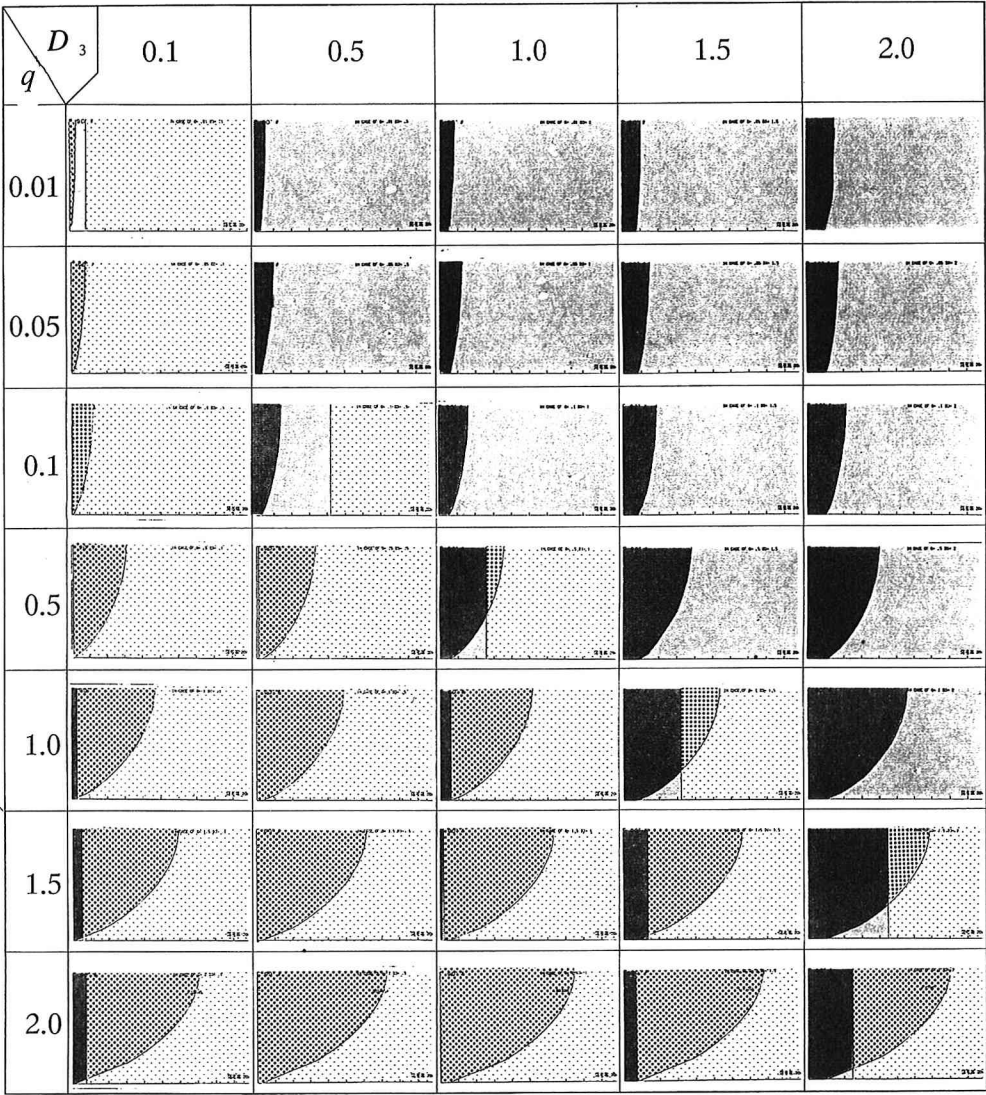


表-1 落水表情予測図



5. ケーススタディー
 ー予測図の使い方とデザインー

表-1の落水表情予測図を用いて岡山県苫田ダム副ダム（建設予定）の設計をスタディする。副ダムは本ダム上流約5 kmに立地し、レクリエーション施設として利用されることが期待されている。以下、諸元を示す^{5) 6)}。

- ・副ダム本体総延長100m
- ・全落差15m
- ・平常時流量約5～20m³/s（冬期平均単位幅流量 $q=0.06\text{m}^2/\text{s}$ ・春／秋期平均単位幅流量 $q=0.1\text{m}^2/\text{s}$ ・夏期平均単位幅流量 $q=0.2\text{m}^2/\text{s}$ ）

本論文では表-2の2案について検討する。なお、今回のケーススタディーでは落水の4つのデザインパラメーターのうち、下流設定水深D3は1 mに仮定した。

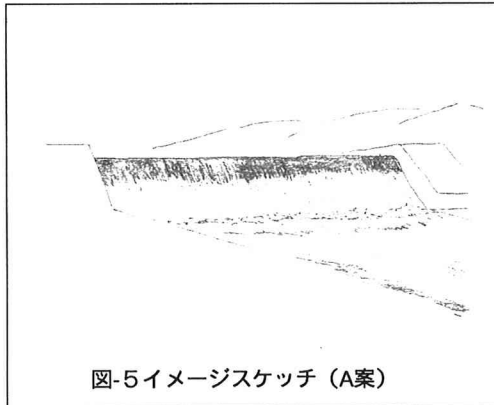
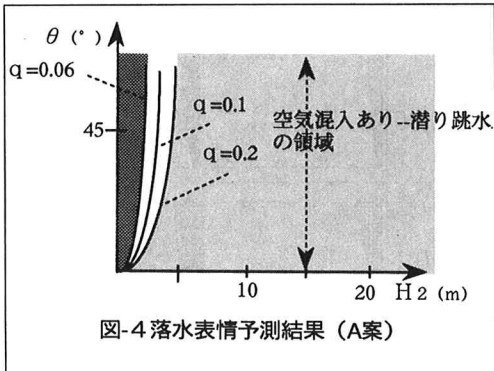
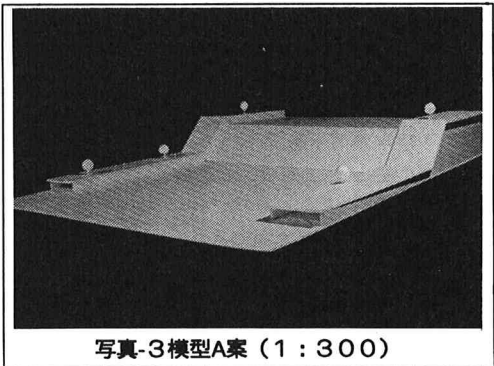
表-2 ケーススタディー案とその諸元

諸元	A	B
形式及び落差高	越流型一段単断面 15 m	自由落下型一段単断面6m +越流型3段各段3 m段面漸次変化
plan	流下方向 	流下方向
section		B1 B2 B3 B4

(1) A案（従来型）

A案は経済性を最優先した従来通りの教科書的設計によって起こりうる形としてスタディーを行った。模型は落水面角度（ θ ） $\approx 45^\circ$ で製作（写真-3参照）してあるが、スケールの15mで一段では、かなりの威圧感があり、下流側をレクリエーションに利用するには不適當であろう。また、落水表情の面からしても単調である。図-4にあるように、流量の季節変動及び落水面角度変化に伴う表情領域の

遷移は見られない。つまり、年間を通じて副ダムの落水面ではいつも空気混入を起こし、着水面では常に潜り跳水が起こっている状態なのである。つまり、落差15mを一段で落とすと決めた時点で、落水面角度に関係なく落水の表情は決定されてしまうのである。このような形状の副ダムでは、デザインの自由度は極めて小さいと言ってよかろう。イメージスケッチを図-5に示す。



(2) B案（表情演出型）
 B案はA案と比較して、落水表情演出のコンセプト

トのもとに多様な流れの表情を持つよう考えた案である。表-2にあるように、まず全落差の15mを6m+3m+3m+3mの合計4段で落とすようにした。また、6mの落差B1は自由落下型に、各々3mの落差B2、B3、B4は越流型にした。さらに、B2、B3、B4に関してはその落水面角度が河道中央から両岸に向かって45°から15°へと渐变するように設計した。各段の平面形状にも配慮を施した。構造物そのものの形の善し悪しについての議論は他に譲ることとして、ここではその落水表情をB2、B3、B4の3段について検討しよう。

まず、冬期の流量が少ない渇水期は、a-a'断面、b-b'断面、c-c'断面ともに空気混入---自由跳水の表情領域に属している（図-6 $q=0.06$ 参照）。つまり、3段ともA案と同様な表情を持つ。しかし、春秋期の比較的流量の安定した時期になると、河道中央付近では依然、空気が混入しているが、岸よりc-c'断面では空気が混入しない表情に遷移してくる。つまり、両岸から中央部へ向かうにしたがって徐々に空気が混入して、水が白みだし、中央部が最も白むのである。その上、B2B3B4とその平面形状で曲率が小さくなっているため、上段から下段にかけて、その中央部で白む長さが徐々に長くなり、立面的には水の白さが三角形状に見ることができる（図-6 $q=0.1$ 参照）。一方、夏期の増水期になるとa-a'断面、b-b'断面、c-c'断面ともに、空気混入のない領域へ遷移するため（図-6 $q=0.2$ 参照）、全落差面にわたって布状の透明な落水を楽しむことができるのである。日本の河川の特徴でもある流量の季節変動を流れの表情としてデザインし、来訪者を魅了する副ダムとすることができる。イメージスケッチを図-7に示す。

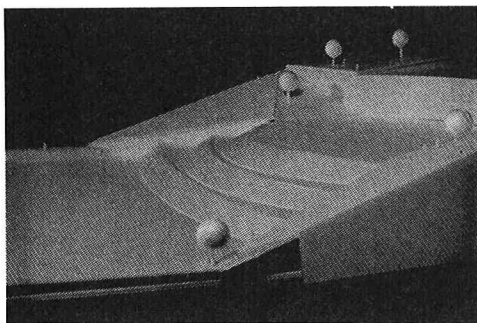


写真-4 模型B案 (1:300)

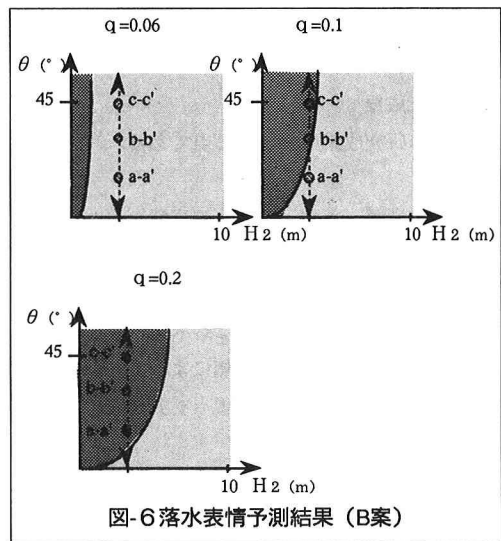


図-6 落水表情予測結果 (B案)

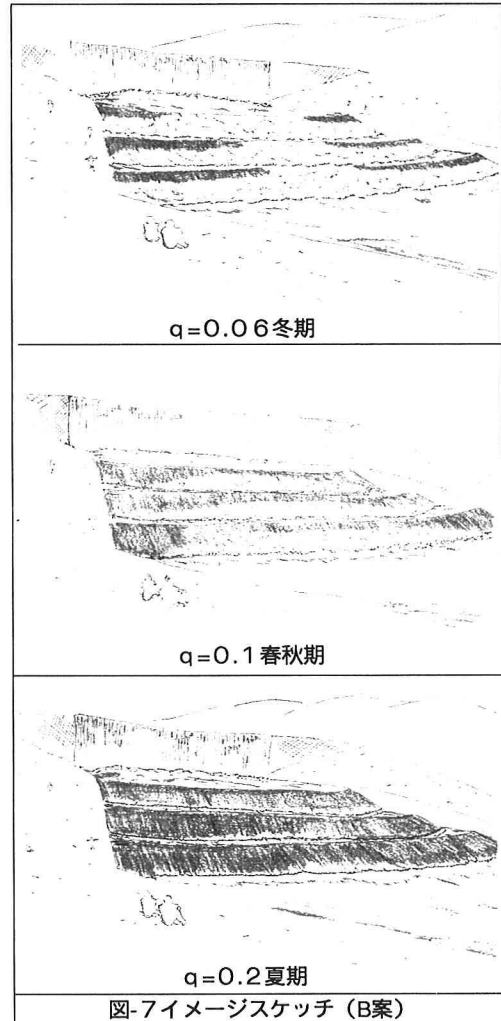


図-7 イメージスケッチ (B案)

6. 結論

(1) 研究成果

本論文の研究成果は以下の2点である。

- 1) 越流型堰、落差工の流れの表情を落水部と着水部にできる泡、水の白みに着目し4種類に分類した。その上でそれらの表情と水理学的条件を対応付けた。具体的には落水部は乱流境界層発達による空気混入の有無によって、着水部は自由跳水か潜り跳水かによって表情との対応付けを行った。
- 2) 単位幅流量、下流設定水深、落差高、落水面角度の4つのデザインパラメーターによる、越流型堰の落水表情予測図を作成した。また落水予測図を用いたケーススタディーによって、一つの構造物で多様な落水表情演出を可能にするプロセスを提示した。そうすることで、この落水予測図に基づいたデザイン方法論の有効性を確認した。

(2) 今後の課題

本論文によって河川横断構造物の新たなデザイン方法論の端緒を開くことができたが、本文中でも言及したように、その表情予測理論は初歩的段階である。今後は以下に示す方向からの検討が必要である。

- 1) 落水表情予測図の拡張と精緻化が必要である。
- 2) 予測精度の実験的検証が必要である。
- 3) 一次要因、二次要因を考慮した設計への展開が可能である。

末筆ではあるが、本稿をまとめるにあたりご指導いただいた東京大学工学部玉井信行教授、磯部雅彦教授、河原能久助教授、齋藤潮助教授、岡山大学工学部名合宏之教授に深く感謝の意を表したい。また、多くの資料をお貸し頂いた(株)建設技術研究所の西原二五江氏、研究作業上の多大なる協力を頂いた当大学院OBの平野勝也氏、中井祐氏、当大学院山口聡一郎氏に御礼申し上げ、本稿の結びとする。

参考文献

- 1) 日本河川協会編：河川管理施設等構造令,山海堂 1978年
- 2) 柴田道夫：実用水工学とその計算例,現代理工学出版,1973年
- 3) 土木学会編：土木工学ハンドブック,技報堂 pp1835,1989年
- 4) 土木学会編：水理公式集,技報堂 1963
- 5) 苫田ダム環境デザイン検討委員会資料
- 6) 流量規模別、月別発生頻度 (S53年～H3年) 苫田ダム日最大時刻流入量より